

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN HEXÁPODO ROBÓTICO EMPLEANDO EL DRIVER “INTECMX14” PARA EL CONTROL PARALELO DE MOTORES

Eduardo García Sotuyo

Instituto Politécnico Nacional/Centro de Investigación e Innovación Tecnológica
egarcias1600@alumno.ipn.mx

Viridiana G. Hernández Herrera

Instituto Politécnico Nacional/Centro de Investigación e Innovación Tecnológica
vhernandezhe@ipn.mx

Octavio Sánchez García

Instituto Politécnico Nacional/Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada,
osanchez0112@gmail.com@ipn.mx

Moisés V. Márquez Olivera

Instituto Politécnico Nacional/Centro de Investigación e Innovación Tecnológica
mvmarquez@ipn.mx

Resumen

Los robots móviles por sus características requieren de estructuras estables y sistemas de control con las capacidades para lograr movimientos fluidos o naturales, proyecto propone un hexápodo con tres grados de libertad construido a base del uso de nylalloy como material principal, utilizando 18 servomotores distribuidos en juegos 3 por cada extremidad, con uso de una tarjeta FPGA atlys para el desarrollo de una programación paralela dentro de 4 rutinas de movimiento diferentes cuyas posiciones fueron calculadas por el método de cinemática de Denavit-Hartenberg y el método inverso haciendo uso de matrices Homogénea.

Palabras clave: Denavit-Hartenberg, Hexápodo, Robot móvil.

Abstract

Mobile robots by their characteristics require stable structures and control systems with the capabilities to achieve fluid or natural movements, proposes a game with three degrees of freedom built using nylalloy as the main material, using 18 servomotors distributed in games 3 for each tip, using an atlys FPGA card for the development of parallel programming within 4 different motion routines whose positions were calculated by the Denavit-Hartenberg direct kinematics method and the inverse method with the use of homogeneous matrix.

Keywords: *Denavit-Hartenberg, Hexapod, mobile robot.*

1. Introducción

Los continuos avances tecnológicos han tenido como efecto colateral que áreas como la robótica móvil presenten un creciente interés por parte de la comunidad científica [1], no obstante, los diferentes retos a los que se enfrentan esta clase de robots no son triviales, por lo que una estrategia es subdividir los problemas y ofrecer soluciones parciales que en conjunto mejoren el rendimiento del robot mientras realiza la tarea objetivo. Un robot móvil como su nombre lo indica debe ser capaz de desplazarse eficientemente de un punto a otro, por lo que uno de los primeros problemas a resolver es la locomoción y morfología del mismo considerando su entorno de navegación, de tal manera el reto es desarrollar diseños que permitan al robot desplazarse con movimientos fluidos, lo que ha dado como resultado robots inspirados en los seres vivos, tales como insectos, reptiles, anfibios e incluso humanos, etc.

Entre los trabajos interesados en el diseño y desarrollo de estructuras morfológicas versátiles de robots móviles se encuentra el de Pfozter et al. [2] que proponen el robot modular KAIRO 3, cuya forma se encuentra inspirada en una serpiente, la ventaja competitiva de su diseño radica en su diseño modular, lo que permite mayor flexibilidad y adaptación durante su desplazamiento, además de mejorar la velocidad en comparación con su predecesor. Ravalli et al. [3] diseñan un robot en forma de pez el cual es capaz de nadar según las directivas recibidas por variables químicas leídas de sensores integrados al robot. Los insectos son

otra morfología ampliamente estudiada debido a la estabilidad que presentan durante su desplazamiento, Kolesnikov [4] quien propone un análisis matemático con el objetivo de mostrar la separación adecuada entre cada extremidad de un hexápodo, esto con el propósito de evitar colisiones entre ellas, concluyendo que la base circular presenta mejor simetría para la distribución de las mismas. Saranli et al. [4] proponen al robot RHex, que es un hexápodo con solo seis actuadores logrando simplicidad mecánica que resulta en una operación confiable y robusta en las tareas del mundo real incluso bajo terrenos accidentados, ya que con el diseño propuesto se logra una locomoción estable y altamente maniobrable. Agheli et al. [5] presentan a SHeRo un hexápodo escalable con aplicaciones en el mantenimiento, reparación y operaciones en entornos hostiles, los cálculos de cinemática inversa se realizan en una computadora por lo que se mantiene una comunicación vía RS232 con el robot, las pruebas realizadas muestran la versatilidad y limitaciones del diseño.

Uno de los problemas de importancia que presentan los robots móviles es el accionamiento de motores, ya que está directamente relacionado con el hardware empleado para su control, es posible clasificar el tipo de paradigma de control en dos vertientes, el control secuencial es la principal forma para la realización de movimiento de un robot, en donde el accionamiento se realiza motor a motor, lo cual implica retardos acumulativos en la acción de los mismos, sobre todo si se considera que dependiendo de la morfología del robot móvil es necesario activar varios motores a la vez. Algunos trabajos con el tipo de paradigma de control secuencial son el robot SHeRo el cual hace uso de tecnología Arduino, siendo el controlador maestro es un ArduPilot mientras que para el control de los motores en las extremidades del hexápodo se hace uso de Ardu Pro-minis. Melo et al. [6] presentan un robot modular en forma de serpiente que emplea servomotores Dynamixel controlados por procesadores ARM Cortex y ATmega2561, en este robot también se puede observar un control secuencial debido al tipo de hardware. No obstante, generar movimientos fluidos bajo las diferentes morfologías de los robots requiere la activación de más de un motor a la vez, con lo que se hace necesario un hardware capaz de implementar el segundo paradigma basado en

control paralelo donde el sistema empleado realiza la misma tarea con un tiempo mejorado o también llamado concurrente. Existen trabajos en el control paralelo de motores pero no implementados en robots móviles, no obstante son igualmente útiles como referencia para la realización del presente trabajo. Hüseyin Oktay Erkol et al. [7] propone usar un FPGA para el control de servomotores por medio de un lazo cerrado, este trabajo logra un control preciso de la variante de posición además del ahorro de recurso en hardware debido al uso de la tarjeta de desarrollo nos permite el control de más de un motor con un solo controlador. Martínez Fernández [8] bajo el uso de un FPGA propone un control paralelo para servomotores BLDC enfocado en la precisión de posición controlada por el sensor encoder que usa el control de lazo cerrado del PID. Argote et al. [8] emplea un control en utilizando un FPGA donde el propone la manipulación únicamente de sus motores mediante una señal de reloj aun cuando no es paralelo su control este hexápodo muestra una fluidez aceptable por el hecho de que la velocidad que maneja es suficiente para evitar un movimiento pausado. A solucionar el conteo de pasos tenemos la investigación de Cruz-Contreras et al. [9] emplean un sensor encoder para conocer la posición de su motor aunque para el conteo no se quedó únicamente con los flancos de subida sino que al considerar los flancos de bajada se duplica la eficiencia del conocimiento del conteo así es como con mayor precisión conoce la nueva posición de su motor después de haber hecho un desplazamiento.

Con el uso de un solo controlador el cual es un FPGA Spartan 6 se pretende el lograr un control paralelo de 18 motores con la capacidad de variar entre lo que es una de su cuatro rutinas pre programadas, esto es bajo una estructura diseñada a partir de una base rectangular con su distribución simétrica entre cada una de sus extremidades permitiendo un amplio rango de movimiento bajo el uso de 12 servomotores y 6 Dynamixel con el objetivo de poder demostrar un movimiento fluido además de explotar las capacidades del sistema de control paralelo así como la estabilidad y fluidez de la estructura a diferentes rutinas y velocidades.

2. Métodos

El desarrollo del proyecto con lleva más de un área de conocimiento bajo la cual se va a desempeñar como es la parte de control para cada motor, el desarrollo mecánico y la parte de potencia es necesario mencionar cada una de ellas tanto individualmente como en conjunto.

Selección de motores

Los motores al ser la parte esencial de transmisión de movimiento estos requieren de ser seleccionados con sumo cuidado siempre considerando cada una de las necesidades del mecanismo sobre las cuales se van a desempeñar ya sea si necesitan de giros a alta velocidad, precisión en su posición o únicamente un desplazamiento definido por grados, cual sea siempre hay que considerar la amplia gama existente sobre los diferentes tipos de motores.

Las características de los motores nos ofrecen diferencias conforme a su composición y características inicialmente encontramos los universales, corriente directa y corriente alterna, no enfocamos dentro de los motores de corriente directa ya que esto nos permiten modificar su velocidad por medio del cambio de tensión además de que sus aplicaciones son ilimitadas debido a sus diferentes tamaños y construcciones, dentro de estos tenemos tres variables básicas que puedes controlar en los motores que son velocidad, precisión y aceleración la importancia de cada una depende de la utilidad que esta va a tener así como el tipo de motor a usar. Dado el caso del hexápodo robótico es de mayor importancia el control de la posición ya que requiere de la mayor precisión posible, si se llegara a encontrar un movimiento que supere el margen de error esto se vería reflejado en variaciones de movimiento e inestabilidad en el robot al momento de desplazarse.

Dentro de la gama de opciones de motores que tenemos las opciones más cercanas a la necesidad de precisión tenemos los motores paso a paso los cuales con el uso de un sensor encoder le permiten fijarse en una posición esto mediante el conteo de flancos logra su posición al ajustar sus engranes imantados entrando en contacto uno con otro, los servomotores son motores que nos permiten

colocarnos dentro de una posición determinada por medio de la señal de un PWM(Pulse Withd Modulación) es una señal trabaja a base de un oscilador capaz de cambiar el tiempo del ciclo de trabajo, el servomotor utiliza esta señal para posicionarse en un Angulo definido por el tiempo que marque la señal resultante del PWM.

Característica del servomotor

Las que conforma a un servomotor son un circuito de control, caja de engranes y motor CD dentro del motor podemos encontrar que cuenta con imán permanente y escobillas, el conjunto de estos conforman a un servomotor esto permite un rango de movimiento de 180° el cual lo define la señal de PWM, habiendo una gran variedad de servomotores el escoger el indicado es necesario conocer las características del consumo de voltaje y corriente, dimensiones, torque y tiempo de trabajo.

Una vez realizado el estudio de mercado el servomotor final es el “GS-4060bb” debido a sus características es el más adecuado a las necesidades del hexápodo ya que su consumo no es excesivo, el torque máximo supera la necesidad del peso máximo a levantar además que por sus dimensiones la base es ajustable a un tamaño aceptable para el hexápodo así como en sus extremidades, como se muestra en la figura 1.



Figura 1 Servo motor GS-4060BB.

Estructura

Siendo los motores la causa del movimiento el efecto del mismo es dado por la estructura mecánica del hexápodo robótico, robots de esta naturaleza siempre han

sido inspirados en la fauna de nuestro mundo, considerando que podemos encontrarlos diferentes formas anatómicas en los insectos en los cuales las estructuras de los robots como este son inspiradas en ellos. A estos robots se les conoce como robots con patas dentro de los cuales tenemos bípedos, cuadrúpedos, hexápodo, octópodo etc...

Se definió por hexápodo ya que con su número de extremidades nos ofrece una mayor estabilidad que los cuadrúpedos y bípedos al contrario de un octópodo su desventaja es que para su movimiento no consta de un patrón estable sino que el movimiento depende de la variación de su ámbito y la dirección a tomar, la locomoción trípede del hexápodo permite una rutina simétrica de movimiento lo cual facilita el desplazamiento ya que la mitad de sus extremidades siempre se mantienen estáticas mientras que la otra mitad realizan un desplazamiento así la estabilidad del robot no se pierde sin importa la velocidad que este pueda llevar.

Como punto de origen es esencial comenzar con la descripción de la forma la cual varían entre formas circulares, hexagonales y cuadradas al definir estas formas depende mucho de la posición a colocar las extremidades, los ángulos de libertad que se les va a brindar y la distancia que se va a encontrar entre sí en este caso hace uso de una base cuadrada con el fin de brindarle a las extremidades esquinadas un rango de libertad de 90 grados mientras que las extremidades centrales tiene un rango 70 grados.

Cabe mencionar que cada uno de los motores cuenta con un capuchón (figura 2) con una flecha inferior con una relación concéntrica a la flecha del motor, al tener esta relación es cómo podemos transmitir el movimiento de giro sin causar un esfuerzo en la estructura de la extremidad o bien en la del motor mismo.

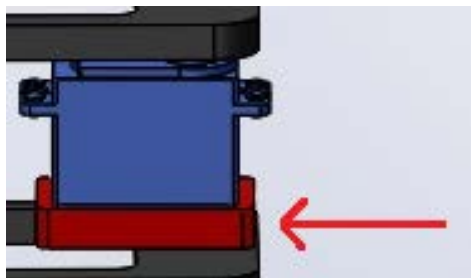


Figura 1 Capuchón.

Primer Eslabón

La estructura de los brazos consta de 3 eslabones y 3 articulaciones con el fin de tener un mayor alcance al momento de desplazarse, el primer eslabón como el punto de origen se encuentra atado a la base con una estructura en forma de “U” donde en la base superior se encuentra el acople del motor mientras en la base inferior se encuentra un balero ambos con el propósito de transmitir el movimiento rotacional producido por el primer motor al resto de la extremidad (figura 3).

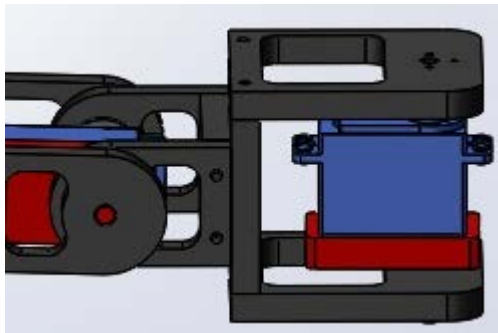


Figura 2 Primer Eslabón.

Segundo Eslabón

El segundo eslabón se encuentra fijo con la misma estructura con forma de “U” el acople y el balero cumplen la misma función de transmitir el movimiento y levantar al segundo, tercer eslabón y a la tercera articulación sin embargo la base superior en la base superior del lado contrario del acople encontramos un segundo acople concéntrico de igual forma a la flecha del motor con el motivo de que este segundo acople pueda atar al brazo, el acople de la base inferior cumple con el mismo propósito el atar al segundo brazo (figura 4).

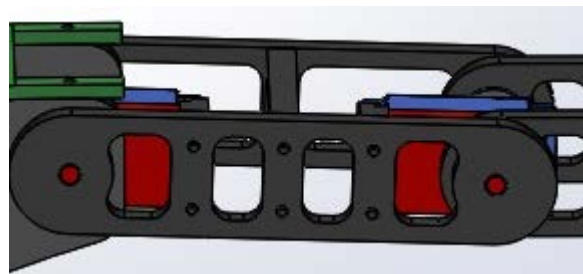


Figura 4 Segundo Eslabón.

Para mantener la dirección de eslabón y de la articulación paralelamente se hace uso de un bloque que realiza esta función este bloque está atado a la lateral del motor y a la base del segundo brazo, al mismo tiempo encontramos a un segundo bloque con el fin de mantener una distancia fija entre los brazos la cual nos da la amplitud necesaria para evitar choque entre piezas que generarían fricción y arrastre.

Tercer Eslabón

El tercer eslabón (figura 5) mantener la parte externa del brazo y mantiene a la tercera articulación la cual es la parte final de la extremidad de igual forma que el segundo brazo cuenta con un bloque atado al extremo del motor y al brazo inferior esto con el fin de mantener en forma paralela la dirección del brazo y el motor a su vez la distancia de los brazos entre sí, el brazo superior al igual que el eslabón 2 tiene un acople concéntrico con la flecha para unir a la pata izquierda y al brazo, las “patas” al ser el final de la extremidad son las encargadas de entrar en contacto con el piso, la pieza de la izquierda tiene el acople en cuanto que la de la derecha tiene el balero que cumplen con el mismo objetivo de transmitir el movimiento casi llegando al final de las patas se coloca un bloque con la función de mantener la distancia y el paralelismo entre ambas piezas.

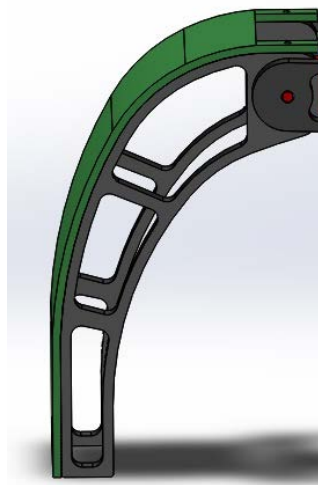


Figura 5 Tercer Eslabón.

En la estructura se pueden observar diferentes aberturas en cada una de las piezas esto se hizo con el fin de reducción de peso para evitar el sobre esfuerzo que producirían los motores.

Numero de motores

Un robot mientras más motores lleven mejor será observara la fluidez de su movimiento ya que al aumentar el número de eslabones y articulaciones nos permite generar movimientos más complejos que nos lleva desde desplazamientos y rotaciones en diferentes ejes.

El Hexápodo posee 3 articulaciones y tres eslabones las cuales en conjunto nos brinda 3 grados de libertad los cuales producen diferentes tipos de movimiento dependiendo de la posición de cada eslabón, el primer movimiento es rotacional en el eje X y lo realizan 6 motores dos movimientos de desplazamiento que son independientes entre sí en el eje Z hecho por 12 de los motores distribuidos 2 en cada una de las extremidades, al investigar la anatomía de robots similares se observan que la forma de construcción siempre es variable aunque con el mismo objetivo al haber escogido darle tres grados de libertad influye que el primer eslabón va a permitir la traslación del hexápodo, el segundo y tercer eslabón se encargan generar el movimiento de levantamiento de cada extremidad y nos permite alcanzar una mayor distancia.

Aun cuando hay mecanismos similares y diferentes la fluidez del movimiento solo puede ser brindada por el conjunto que es un mecanismo estable y sin interrupción en sus grados de libertad además del tipo y la forma del control que se le brinde. Siestas partes logran conjuntarse el resultado será un movimiento natural sin importar la cantidad de motores la única restricción será los grados de libertad que se le brinden.

El modelo mecánica propuesto fue llevado a Solís workshop para poder tener lo que es un diseño digital del hexápodo terminado y de igual forma realizar una prueba visual del rango de libertad que las extremidades tendrán sin colisionar unas con otras además de que la animación cumple con la función de dar una primera vista de lo van a ser las diferentes rutinas y así poder corroborar si la

secuencia propuesta es la correcta una vez que se confirmó que el modelo propuesto es ideal y no cuenta con errores se lleva al siguiente paso del proceso.

Diseño e Implementación del control paralelo de motores

El control paralelo al ser el punto a destacar sobre este proyecto nos muestra la ventaja que existe entre esta forma de control y la tradicional, permitiendo como consecuencia la visualización del movimiento mecánico de una forma más ágil, y fluida además de la reducción de los recursos como son en hardware, software y el tiempo de trabajo.

Programación en VHDL

Para la construcción del control se ha usado la plataforma de Xilinx usando el lenguaje de programación de VHDL el acrónimo es el resultado de la combinatoria de dos acrónimos diferentes HDL (Hardware Descripción Lenguaje) que nos permite trabajar con lenguajes de descriptivos y formar bloques con diferentes características que los bloques de la plataforma no pueden ofrecernos, además del segundo acrónimo que es VHSIC (Very High Speed Integrated Circuit) que nos habla acerca de la velocidad sobre la que son capaces de trabajar cual nos permite trabajar.

Esta plataforma no ofrece ventajas como es la construcción personalizada del control esta la adaptamos a la necesidades de nuestros recursos que en hardware se reducen drásticamente por el uso de una sola tarjeta de desarrollo que contiene el controlador para cada uno de los motores, esto nos da la facilidad de desarrollar e implementar el control paralelo.

Control de Servomotores

Un servo motor por su composición únicamente puede controlarse por PWM, en el caso de los servos GS-4066bb dentro de un periodo de 20ms puede cambiar su posición dentro del tiempo de trabajo del 1 ms a 2 ms es donde se encuentran las posiciones que nos permiten desplazar la flecha de 0° a 180°, para la realización del PWM la frecuencia que activa al motor es de 50 HZ el periodo se divide un

numero definido para poder designar un valor binario. Una vez que se obtiene la división del periodo se puede definir bajo qué un valor numérico binario se conoce cuantos grados es que se desplazará a partir de su punto de origen, para conocer y definir este valor se toma en cuenta la figura 6.

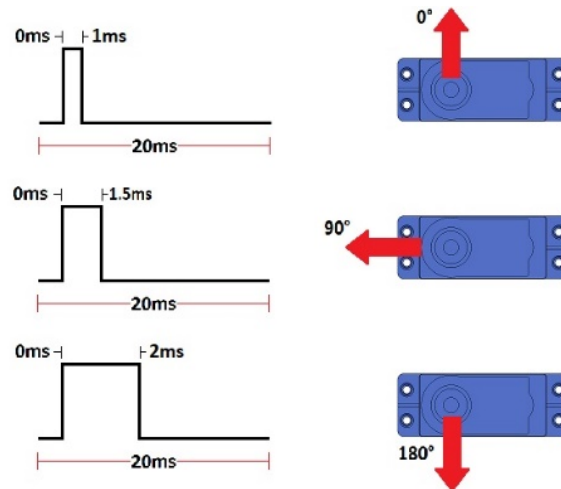


Figura 6 Tiempo de trabajo del Servomotor.

Aun cuando se define el valor del periodo y del tiempo de trabajo para la construcción del periodo se dividió en 1000 partes igual las cuales cada una representa un valor numérico dentro de los cuales de 244 a 115 son los rangos máximos y mínimos para desplazar al motor.

Este proceso es únicamente para poder visualizar teóricamente lo que es el cambio y adaptación de la señal de PWM para el ajuste del servo, la construcción del control ya sea para servo o para los BLDC como ya se ha mencionado han sido realizadas en la plataforma de Xilinx utilizando el lenguaje de programación VHDL empezando con la construcción de lo que es el PWM.

Diagrama de Control

El control requiere de lo que son diferentes bloques compensado con se puede observar en lo que es el diagrama de flujo la señal que sale del oscilador pasa a través de diferentes bloques que designan desde lo que es la rutina de movimiento, señales de activación y la implementación del PWM.

De primera instancia podemos observar (figura 7) que la señal que dé inicio es el oscilador enviando una señal de 100 MHz el primer bloque que tenemos el “divfre” este se encarga de hacer una división de frecuencia hasta llegar a un valor de 190.1348633 Hz lo que representa un la velocidad sobre la cual la señal de activación es enviada al siguiente bloque que es un contador de 4 bits “CB4CE” al recibir el flanco de subida proveniente del divisor de frecuencia este manda una cuenta en incremental hasta llegar a su valor máximo 16 y reinicia nuevamente.

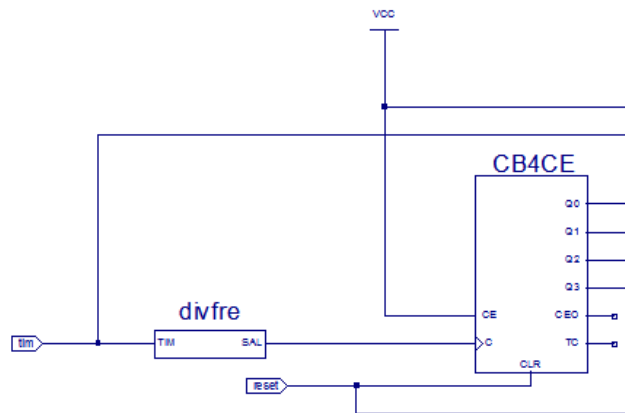


Figura 7 Primera parte del diagrama de control.

Al cambio del valor numérico del contador los bloques “Rut” quienes contienen los valores pre programado de las rutinas al recibir la señal de entrada del contador estos a su salida mandan un valor numérico de 8 bits que representan un valor al que se ajusta el ancho de pulso para colocar la flecha en un ángulo determinado. El siguiente paso son las rutinas de movimiento estas son dependientes del valor de salida del contador estos mandan su señal de salida a un multiplexor 4 a 1 este bloque cuenta con la siguiente condicional (figura 8) siendo “sw” los swich, la variable “a” representa la rutina 1, la variable “b” representa la rutina 2, la variable “c” representa la rutina 3, la variable “z” representa a home.

Con esta propuesta es como se puede realizar la selección de una rutina por un tiempo indeterminado siempre que la condición del multiplexor se cumpla de no ser así el bloque “HOME” resulta ser la salida a demostrar que es una opción diseñada para el tiempo en el que el hexápodo se mantiene en estado estático

(figura 9), además de contar con condiciones de protección si los valores enviados llega a superar los valores máximos para un rango de movimiento estas condiciones ajustan la señal al límite más cercano para evitar que sobre pase sus capacidades de desplazamiento.

```
si sw = 001 entonces
    sal = a
    si no
sw = 010 entonces
    sal = b
    si no
sw = 100 entonces
    sal = c
    si no
    sal = z
```

Figura 8 Seudocódigo del Multiplexor.

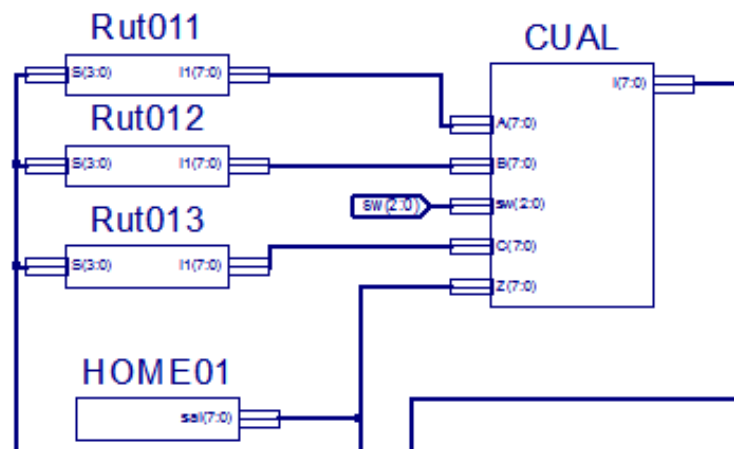


Figura 9 Segunda parte del diagrama de control.

El bloque “peweme” (figura 10) es el encargado de ajustar la señal de reloj a la forma del PWM además de recibir la señal de salida del multiplexor para ajustar el tiempo de trabajo al requerido por el motor para posicionarlo en la posición adecuada para el movimiento en turno. Internamente se genera un diagrama dedicado para la construcción de la señal final del PWM, nuevamente iniciando por el divisor de frecuencia donde esta vez la señal se divide hasta obtener un resultado de 50 Hz, los bloques “filtro” y “monoestable” tienen la función de

mantener la señal sin ruido y estable por alteraciones externas, el multiplexor 2 a 1 se encarga de dirigir la señal entrante ya sea una de las rutinas o el valor de home se manda el a un bloque con la función de mantener un conteo que ajusta del tiempo de trabajo de la señal final.

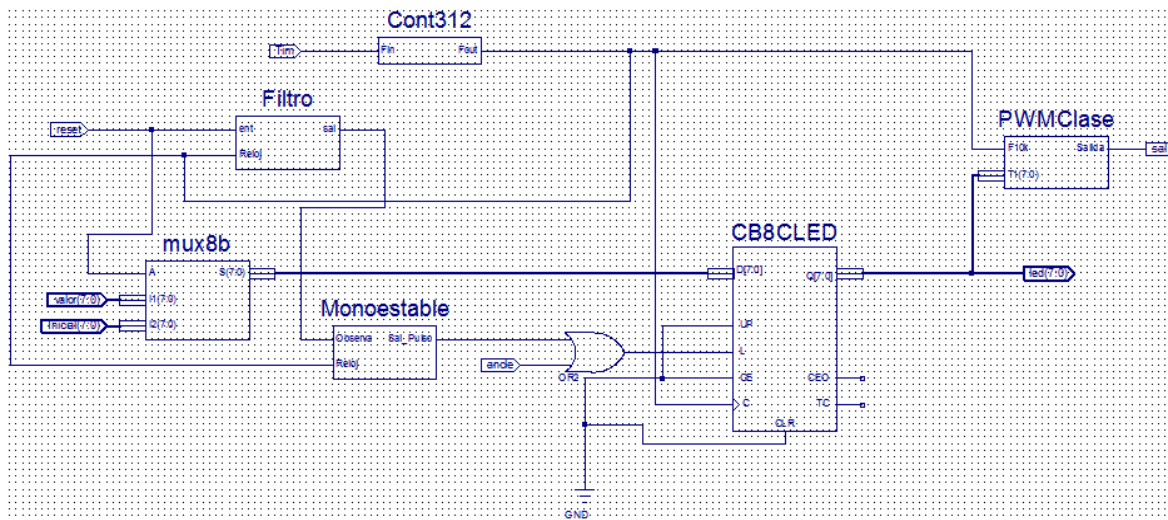


Figura 10 Diagrama de control.

Maquinado

Una vez que se tiene el diseño de la estructura el maquinado es el siguiente paso a seguir ya una vez que se consideró si la estabilidad es la correcta y no muestra señales de juego, distancias entre cada pieza que no se genere fricción ni arrastre, así como que cada pieza encaje en su lugar si ocasionar restricción o colisiones a otras piezas.

Selección del material

Considerando que el peso es uno de los factores más importantes para escoger el material así como los aditamentos extra a utilizar tales como la tarjeta de desarrollo, motores y las baterías, tenemos que escoger un material resistente como el metal o aluminio pero ligero como el plástico o acrílico. Para la estructura se ha escogido el uso de nylalloy que es un plástico de ingeniería aleado con bisulfuro de molibdeno lo que resulta en una mayor resistencia al desgaste y la abrasión, resistencia térmica y química, ligereza, resistencia a bacterias y hongos

además de facilidad al maquinado, con forme a sus propiedades resistivas podemos observar en la tabla 1.

Tabla 1 Propiedades.

Propiedades	Métrico	Ingles
Mecánicas		
Resistencia de tensión	30 MPa	11600 psi
Resistencia de Flexión	3200 MPa	464000 psi
Térmicas		
Temperatura de Fusión	220°C	428 °F
Temperatura de servicio	160°C	320 °F
Eléctricas		
Resistencia superficial especifica	10 ¹² Ω	10 ¹² Ω
Resistencia volumétrica especifica	10 ¹³ Ω * cm	3,93x10 ¹⁶ Ω * m
Constante dieléctrica	3.7	
Resistencia dieléctrica	23 kV/mm	586 kV/pulg
Otras		
Absorción de agua	0.08%	0.08%
Densidad	1.15g/cm ³	1.15 lb/pulg ²

Así como cada material cuenta con sus normas a seguir para someter a maquinado como evitar excesos de presión que puedan deformar, mantener las herramientas con un filo optimo, evitar sobrecalentamientos en la pieza, uso constante de refrigerante durante la operación, usar velocidad de corte lo más alta que nos permita la pieza y asegurarse que la rebaba sea extraída con rapidez

Proceso de maquinado

Al tener el material es necesario que tengan diferentes procesos de maquinado para que terminen con la forma final que en conjunto forman la estructura de la extremidad, en uso de un CNC (Control Numérico Computarizado) es como se llevan a cabo con la finalidad de dar forma a cada una de las piezas.

El control numérico se centra específicamente en lo que son los procesos de barrenado y frezado que representan la parte más fuerte del proceso, que se encargan de dar forma y colocar los puntos en donde se colocan os tornillos que sujetan las piezas entre sí, el nylalloy por su características requieren de

específicas características para su maquinado especialmente sobre la velocidad sobre la cual se debe trabajar siendo en barrenado de una velocidad recomendada de 0.1 a 0.3 mm/revolución, en el fresado debe de ser de 250 a 500 m/min estas medidas son considerando que el material por su parte plástica por el calentamiento de la pieza al entrar en contacto por mucho tiempo el material comienza a presentarse pegajoso dando como resultado una malformación de la pieza (figura 11).



Figura 11 Piezas maquinadas.

Estudio del Movimiento

Para el conocimiento de las posiciones que cada debe de tomar en cada rutina se utiliza el estudio de la cinemática el estudio se divide en dos partes cinemática directa e indirecta. La cinemática directa se encarga de darnos los valores necesarios para darle una posición deseada este estudio se realiza desde el punto de origen al límite de la extremidad, por otro lado el fin de la cinemática indirecta es el conocer los valores necesarios para actual del mecanismo este estudio comienza tomando como punto de partida el límite de la extremidad hasta llegar al punto de origen.

Cinemática Directa

El cálculo de la cinemática directa se realiza para conocer la posición de los elementos del robot el método empleado es el de Denavit-Hartenberg el método requiere del uso de matrices transpuestas por medio de 4 variables las cuales son θ , α , d y a (tabla 2).

Tabla 2 Interpretación de los parámetros.

Parámetro	Interpretación
Θ	Angulo de giro el eje Xi-1 alrededor de Zi-1 para que quedar paralelo con Xi
d	Distancia que debe desplazarse Xi-1 en la dirección de Zi-1 para esta alineados
a	Distancia de desplazamiento ente Zi-i en la dirección Xi para coincidir con Zi
α	Angulo de giro a Zi-1 sobre X1 para alinearse Zi

El estudio requiere del análisis de las variables relacionando de 2 eslabones para poder definir los valores de las cuatro variables como resultado de cada relación se obtiene una matriz transpuesta, para un brazo como el que es la extremidad del hexápodo al final obtiene 3 matrices independientes por cada eslabón, el signo final de cada valor es dado por la regla de la mano derecha. Una vez ya teniendo las variables definidas de la relación de entre eslabones, se deben de sustituir en la matriz transpuesta, ecuación 1.

$$\begin{pmatrix} C\theta & -C\alpha S\theta & S\alpha S\theta & \alpha C\theta \\ S\theta & C\alpha C\theta & -S\alpha C\theta & \alpha S\theta \\ 0 & \alpha & C\alpha & d \\ 0 & 0 & 0 & l \end{pmatrix} \quad (1)$$

El estudio de los eslabones ofrecen diferentes matrices conforme a la distancia y la rotación que hay en la relación entre cada eslabón como resultado a su respectivos ejes se obtienen las siguientes 3 matrices, ecuaciones 2, 3 y 4.

$$\begin{pmatrix} C(q1) & -S(q1) & S(q1) & L0C(q1) \\ S(q1) & C(q1) & -C(q1) & L0S(q1) \\ 0 & 1 & C(q1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

La matriz del segundo eslabón ya con los valores sustituidos de la matriz transpuesta.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & L1 \\ 0 & C(q2) & -S(q2) & 0 \\ 0 & S(q2) & S(q2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

La tercera matriz del primer eslabón de igual forma con los valores sustituidos de la matriz transpuesta.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C(q3) & -S(q3) & 0 \\ 0 & S(q3) & C(q3) & L2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Con cada una de las matrices resultantes se debe de realizar una multiplicación de matrices comenzando con la multiplicación de 2 matrices y la resultante de la operación se multiplica una vez más con la matriz faltante el resultado de esta operación se demuestra en ecuación 5.

$$\begin{pmatrix} Cq1 & . & . & Sq2L2 - Sq1q2L2 + L1Cq1 + LOCq1 \\ . & . & . & LOL1Sq1 + LOSq1 - 2Cq1L2Cq3 + LOL1Sq1 + LOSq1 \\ . & . & . & 2Cq1 - L2Cq3 \\ 0 & . & . & L1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

De la matriz transpuesta final los valores que nos indican los desplazamientos de distancia y angulares finales de la extremidad son los de la columna 4. El proceso cinemático directo es únicamente para conocer los valores que se deben de designar para llegar a aun posición desganada.

Cinemática Indirecta

El estudio de la cinemática indirecta se aplica para conocer los valores de las coordenadas de la extremidad para que su extremo se posicione y oriente según una determinada localización espacial. Para su cálculo se utiliza el método de transformación homogénea, donde consta de despejar las variables “q” en función de las componentes de los vectores “n”, “s”, “a” y “p”. El estudio de la cinemática directa es donde comienza el estudio de la cinemática indirecta a partir de las diferentes matrices que se obtuvieron el primer método se vuelven a utilizar esta vez utilizando una matriz de 4x4 con los valores de diferentes coordenadas, ecuación 6.

$$\begin{pmatrix} nx & sx & az & px \\ ny & sy & ay & py \\ nz & sz & az & pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Donde cada una de las variables se puede definir como, los efectos de traslación, rotación y desplazamiento de la estructura mecánica una vez aplicada la matriz homogénea se puede verificar con el valor de la columna cuatro los nuevos valores de desplazamiento al cual se debe de adaptar para su nueva posición.



Figura 12 Hexápodo Final.

3. Resultados

Durante la etapa de pruebas ya en conjunto el control y mecanismo armados se debe de probar el resultado del trabajo en conjunto, como el control de motores que se debe de repetir una vez por motor bajo una estructura maestro-esclavo para coordinar el tiempo en el que se van a enviar las señales de activación para cada motor, por otra parte el mecanismo requiere de una etapa de pruebas para asegurarse de la ausencia de colisiones sobre las piezas.

Prueba de mecanismo

Con el estructura de una de las extremidades ensamblada de conecta al control para probar el desplazamiento de cada uno de los motores en su valor máximo y mínimo esto con el fin de conocer si la orientación del motor y la distribución de los grados es correcta así como conocer si el comportamiento en conjunto y

asegurarse de que los motores sean capaces de soportar el peso a cargar respectivo de su posición.

Prueba de control

Con la idea de migrar el control a lo que es un joystick por medio de un multiplexor de 4 a 1 es como se decide que rutina es la que se va emplear las rutina programas son de avance, retroceso, giro sentido horario y giro sentido anti horario cada una cuenta con su propia rutina independiente de instrucciones una vez ya considerando las limitaciones mecánicas para la designación de los grados de movimiento evitando colisiones.

Rutina de Avance y Retroceso

- El primer paso consta de mover los motores 1, 4 y 5 15 grados mientras que al mismo tiempo los motores 7, 10, 11, 13, 16 y 17 se desplazan 20 grados provocando el levantamiento del brazo.
- El segundo paso los motores 7, 10, 11, 13, 16 y 17 regresan a home.
- Durante el tercer paso los motores 2, 3 y 6 se desplazan 15 grados para realizar el desplazamiento del cuerpo, los motores 1, 4 y 5 regresan a su posición home desplazándose 15 grados, por último los motores 8, 9, 12, 14, 15 y 18 se desplazan 20° para la elevación de las extremidades.
- El cierto paso regresa los motores 8, 9 12, 14, 15 y 18 20 grados esto con el fin de regresar a tener contacto con la base dónde este colocado.

Estos son los cuatro pasos básicos para la realización de la rutina de avance y retroceso esto se repite por un tiempo indeterminado hasta que la señal de reloj deje de ser enviada al registro que guarda la rutina, ya sea que se dese avance o retroceso depende del sentido de giro del motor (tabla 3).

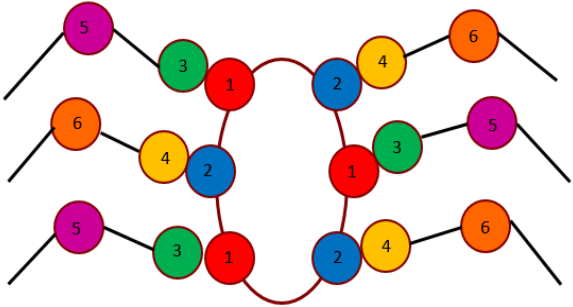
Rutina de giro

Como segunda rutina se tiene lo que es un movimiento rotacional, a comparación de las rutinas de desplazamiento esta rutina no desplaza

simétricamente sus grupos de motores los motores de colocados en la parte central por la relación tan cercana:

- Durante el primer paso lo motores 1 y 5 se desplazan 20 grados, y el motor 3 realiza un desplazamiento de 15 grados al mismo tiempo que los motores 7, 9, 11, 13, 15 y 17 realizan su despulsamiento habitual para el levantamiento de la extremidad.

Tabla 3 Rutina de avance y retroceso.



Avance y Retroceso						
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6
Paso 0	30° ➡		25° ⬆		25° ⬆	
Paso 1			25° ⬇		25° ⬇	
Paso 2	30° ⬅	30° ➡		25° ⬆		25° ⬆
Paso 3				25° ⬇		25° ⬆
Paso 4	30° ➡	30° ⬅	25° ⬆		25° ⬆	

- El segundo paso los motores 7, 9, 11, 13, 15 y 17 se desplazan al punto de origen.
- Durante el tercer paso lo motores 2 y 6 se desplazan 20 grados, el motor 4 realiza un desplazamiento de 15 grados simétricamente los motores 8, 10, 12, 14, 16 y 18 realizan su desplazamiento habitual para el levantamiento de la extremidad mientras que los motores 1, 3 y 5 regresan al origen.

Este ciclo de 3 pasos son los necesarios para realizar el movimiento rotacional del Hexápodo, el giro ya sea sentido horario o anti-horario se marca en el desplazamiento de los motores del 1-6 esto independientemente del comportamiento del resto de los motores (tabla 4).

Tabla 4 Rutina de Giro.

Giro						
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6
Paso 0	40° ➡		20° ⬆		20° ⬆	
Paso 1			20° ⬆		20° ⬆	
Paso 2	40° ⬅	40° ➡		20° ⬆		20° ⬆
Paso 3				20° ⬆		20° ⬆
Paso 4	40° ➡	40° ⬅	20° ⬆		20° ⬆	

Al conjuntar cada aspecto previo el resultado final es en el movimiento de un hexápodo robótico implantando el control paralelo (figura 12), la rutina resultante no demuestra el uso de señales con valores diferentes bajo el uso de una misma señal de tiempo como se puede observar en la figura 13 tomada desde un osciloscopio.

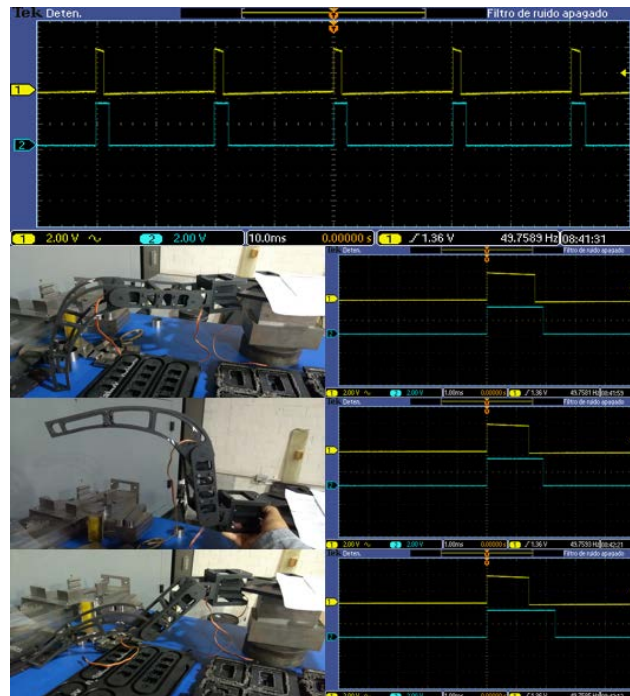


Figura 13 Señales de Movimiento.

Durante el desplazamiento de cada una de las extremidades se pueden denotar la diferencia de los valores de ancho de pulso que se encuentran en el mismo tiempo de trabajo, este efecto se puede visualizar sobre las señales que nos muestra el osciloscopio, físicamente esto se demuestra en los diferentes ángulos y posiciones que toman cada uno de las articulaciones del hexápodo, al modificar los estados de cada uno de los swich designados para la alteración de la rutina primero se observa el regreso del hexápodo a su posición de "Home" y posteriormente comienza la nueva rutina en turno.

Físicamente el mecanismo muestra una firme estabilidad bajo un estático al igual que durante un estado dinámico nos demuestra un cierto nivel de estabilidad que da como resultado un movimiento más fluido y continuo con la excepción de momento en el que se cambia la señal de una rutina, en cuanto a lo que son cada una de las piezas estas se mantienen en su posición fijas si no colisionan unas más entre otras además de no someterse a un gran esfuerzo que alteraría la forma de la pieza o que fuese a causa de una ruptura.

4. Discusión

Culminando con la etapa de pruebas se pudo observar un movimiento más fluido del hexápodo por la forma en la que se manejó el control de cada motor donde cada uno recibió señales independientes bajo la misma sincronización de tiempo activándose en lapsos distintos, lo que a su vez nos permitió el conocer el alcance de las capacidades de la tarjeta atlys 6 así como explotar cada ventaja que nos ofrece como la estructura de la programación paralela, la reducción de recurso en hardware y software así como la adaptación de los diagramas de control que llevan las posiciones programadas de cada una de las rutinas propuestas se llevó a cabo la experimentando el cambio de para conocer el comportamiento de la estructura al recibir un ciclo de instrucciones distinto el cual no fue agresivo como se esperaba.

Por parte del mecanismo la estabilidad que nos brinda el conjunto de las seis extremidades conforme a la estructura de la base y la distribución de los pesos nos demostró las características apropiadas para un movimiento continuo, esto nos

llevó a mantener el cambio ente las 4 rutinas para poder darle dirección y sentido al desplazamiento del hexápodo conociendo si estos cambios en el movimiento alterarían lo que es la posición de las partes de cada extremidad o alteraciones que causen la interrupción del movimiento el cual no fue el caso cada pieza mantuvo su lugar establecido. El conjunto del control y la mecánica demostraron un hexápodo con las características apropiadas para un desplazamiento continuo así como la fluidez requerida para observar un movimiento natural.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] T. Fong, I. Nourbakhsh y K. Dautenhahn, «A survey of socially interactive robots,» *Robotics and autonomous systems*, vol. 42, pp. 143-166, 2003.
- [2] L. Pfitzer, S. Klemm, A. R. R. nau, J. M. Z. llner y R. Dillmann, «Autonomous navigation for reconfigurable snake-like robots in challenging, unknown environments,» *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 89, pp. 123-135, 2017.
- [3] Ravalli, C. Rossi y G. Marrazza, «Bio-inspired fish robot based on chemical sensors,» *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 239, pp. 325-329, 2017.
- [4] U. Saranlı, M. Buehler y D. E. Koditschek, «Rhex: A simple and highly mobile hexapod robot,» *The International Journal of Robotics Research*, vol. 20, pp. 616-631, 2001.
- [5] M. Agheli, L. Qu y S. S. Nestinger, «SHeRo: Scalable hexapod robot for maintenance, repair, and operations,» *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 30, pp. 478-488, 2014.
- [6] K. Melo, J. Leon, J. Monsalve, V. Fernandez y D. Gonzalez, «Simulation and control integrated framework for modular snake robots locomotion research,» *de IEEE*, 2012.
- [7] K. Oh, D. Kim, T. Kim, C. Kim y H. Kim, «Operation algorithm for a parallel hybrid electric vehicle with a relatively small electric motor,» *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 18, pp. 30-36, 2004.
- [8] C. Contreras, E. A. Portilla y R. S. Ortigoza, «Multiplicador Electrónico para Encoder Incremental,» *Polibits*, pp. 63-67, 2008.

- [9] H. O. Erkol y H. Demirel, «A VHDL application for kinematic equation solutions of multi-degree-of-freedom systems,» *Journal of Zhejiang University SCIENCE C*, vol. 15, pp. 1164-1173, 2014.
- [10] L. Pfozter, S. Ruehl, G. Heppner, A. R{\o}nnau y R. Dillmann, «KAIRO 3: A modular reconfigurable robot for search and rescue field missions,» de IEEE, 2014.
- [11] S. Warnakulasooriya, A. Bagheri, N. Sherburn y M. Shanmugavel, «Bipedal Walking Robot-A Developmental Design,» *Procedia engineering*, vol. 41, pp. 1016-1021, 2012.
- [12] Argote, D. Castellanos, J. Vargas, A. Baquero y H. Borrero, Robot m{\o}vil caminador hexápodo con 12 Grados de libertad, Universidad de los Llanos, Colombia, 2009.